

과변조 영역에서의 전류제어를 가지는 영구자석형 동기 전동기의 속도제어

박진식, 김학원, 윤명중
한국과학기술원

Speed Control of PMSM with Current Controller in Overmodulation Region

Jin-Sik Park, Hag-Wone Kim, Myung-Joong Youn
KAIST

ABSTRACT

This paper presents a study on a current control of a PM synchronous motor which is fed by two-level voltage source inverter in the high modulation index area. In order to increase dynamic response and extend speed limit caused by voltage limit, overmodulation method is generally used. The current control in overmodulation have voltage limit. So larger voltage command than voltage limit should be diminished. In this paper, the problem conventional normalization method is analyzed and New normalization method in overmodulation region is proposed.

1. Introduction

최근에 영구자석형 동기 전동기는 높은 전력 밀도와 효율, 우수한 기동토크 특성, 저렴한 유지 보수특성 으로 많은 관심을 받고 있다. 이런 장점들로 인해 고성능을 요구하는 응용분야중에서도 특히, 가전기기 분야(세탁기, 냉장고, 에어컨)에 많이 사용되고 있다. 일반적으로, 가전분야에서는 빠른 동특성과 고속 구동이 중요하다. 이런 특성을 얻기 위해 과변조 기법이 필요하게 된다.^[2]

과변조 영역에서 전류제어는 선형 변조구간과 달리 제어특성이 좋지 않다. 그 이유로는 과변조 방법에 의한 하모닉, 좁은 유효 전압 범위, Normalization 문제가 있다. 이 논문에서는 이 문제들 중에 기존의 normalization에 의해 나타나는 현상에 대해 해석하고, 새로운 방식을 제안한다.

2. PMSM & Inverter model

2.1 PM synchronous motor model

surface mounted PMSM의 전압 수식모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_q}{dt} &= -\frac{r_s}{L_s}i_q - \omega_r i_d - \frac{1}{L_s} \omega_r \lambda_m + \frac{1}{L_s} v_q \\ \frac{di_d}{dt} &= -\frac{r_s}{L_s}i_d + \omega_r i_q + \frac{1}{L_s} v_d \end{aligned} \quad (1)$$

i_q, i_d : q,d axis current
 v_q, v_d : q,d axis voltage
 ω_r : electrical angular velocity
 L_s : stator inductance

r_s : stator resistance
 λ_m : the amplitude of flux linkage

2.2 Inverter model

일반적으로 모터 구동 시스템에서 제어변수는 위치, 속도, 토크이다. 이런 변수들을 제어하기 위해서는 PMSM에 주파수와 크기가 가변이 가능한 회전자계를 생성해야 한다. 주로 주파수와 크기의 변화가 가능한 전압을 인가하기 위해 PWM-VSI (Pulse Width Modulated Voltage Source Inverter)가 사용된다. 전압원 인버터는 Fig. 1과 같은 형태이다.

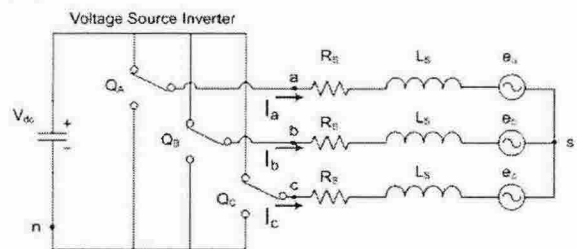


Fig. 1. Simplified voltage source inverter and PMSM model

3. Overmodulation

3.1 Modulation index

m_i 는 인버터의 기본파 성분인 가장 큰 형태인 Six-step operation에서의 기본파 성분인 비율로 정의한다.

$$m_i = \frac{|\vec{v}_s^*|}{\frac{2}{\pi} V_{dc}} \quad (2)$$

선형 변조 영역의 변조범위는 0 ~ 0.9069 이고, 과변조 영역의 변조범위는 0.9069 ~ 1.0 이다.

3.2 Overmodulation

과변조는 carrier-based pwm에서 m_i 에 해당하는 기본파 성분을 유지할 수 있는 two-mode overmodulation을 사용한다.^[3] m_i 가 0.9069, 0.952, 1.0인 C1, C2, C3 과형으로 부터, 그 사이 구간은 아래의 수식을 기반으로 생성한다.

$$y = (1 - \xi_{12}) \cdot x_1 + \xi_{12} \cdot x_2 \quad (3)$$

$$\xi_{12} = \frac{(m_i - m_{i,x1})}{m_{i,x2} - m_{i,x1}} \quad (4)$$

y: generated voltage command
 x₁: limit trajectory 1
 x₂: limit trajectory 2
 m_{i,x1}: modulation index of x₁
 m_{i,x2}: modulation index of x₂

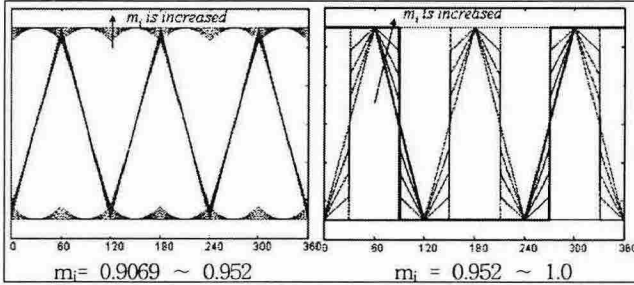


Fig. 2. reference voltage in overmodulation region

mode 2는 mode1에 비해 위상 오차가 크기 때문에, 과변조에 의한 하모닉의 크기가 매우 크다.

3.3 Normalization

Normalization이란 전류제어기의 전압명령이 전압제한을 넘었을 때, 전압명령을 전압제한으로 줄이는 방법이다. 일반적으로 많이 쓰이는 방식은 space-vector plane에서 위상오차가 없도록 V_q와 V_d를 같은 비율로 줄이는 방식이다.^[5]

4. Current control in overmodulation region

4.1 normalization problem

기존의 normalization는 위상오차 없이 전압 명령을 줄이는 방식이다. 이 방식은 인버터의 실제 한계점인 Six-step operation을 넘어선 명령이 들어 왔을 때에는 시스템의 안정성을 해치는 문제가 발생하게 된다.

인덕턴스와 저항으로 인한 전압강하를 무시할 경우 속도 증가에 따른 전압 변화량은 다음과 같다.

$$\left| \frac{dV_q}{d\omega} \right| \approx |Li_d + \lambda_m| > \left| \frac{dV_d}{d\omega} \right| \approx |-Li_q| \quad (5)$$

$$|V_q^*|^2 + |V_d^*|^2 = \left(\frac{2}{\pi} V_{dc} \right)^2 \quad (6)$$

이런 전압 변화량에 대해 기존의 normalization은 V_q와 V_d를 같은 비율로 줄이게 된다. Six-step operation은 (6)에 의해 전압제한이 있기 때문에, 결과적으로 |V_q|는 증가하고, |V_d|는 감소하는 현상이 나타나게 된다.

i_d=0으로 제어하기 위해서는 V_d<0의 값이 인가되어야 하므로, |V_d|가 감소하게 되면, i_d>0이 된다. i_d>0이 되면, q축 전압식에서 i_d=0일 때는 전압이 0이던 성분이, i_d>0가 되면서, i_q가 줄어들게 된다.

결과적으로, i_d>0이 되면서 모터의 효율과 속도가 모두 떨어지는 현상이 발생하게 된다.

4.2 Proposed normalization method

Six-step operation은 전체 전압 명령의 크기가 이미 정해져 있기 때문에, 실제로 제어 가능한 것은 전압명령의 위상이다. 이 위상으로 q축 전류를 최대한 따라가게 할 수도 있고, d축 전류를 최대한 따라가게 할 수도 있다.

q축 전류를 제어하기 위해 V_q를 유지하는 경우는 |V_q|가 증가하면, 마찬가지로, 식(6)에 의해 |V_d|가 감소하게 된다.

d축 전류를 제어하기 위해 V_d를 유지하는 경우는 q축 전류는 명령을 따라가지 못하겠지만, d축 전류는 0으로 제어가 가능하다. 그리고, q축 전류는 i_d=0에서 인버터에서 최대출력(six-step operation)으로 동작하고 있으므로, 실제로 따라갈 수 없는 명령일 것이다.

d축 전류를 0으로 제어하기 위해 d축 전압명령을 원래의 값으로 유지 하고, q축 전압 명령만을 줄여서 six-step 으로 줄인다.

$$V_q^*, V_d^* (m_i > 1) \rightarrow kV_q^*, V_d^* (m_i = 1) \quad (7)$$

4.3 normalization in PI-controller

일반적으로 PI 제어기에서는 anti-windup이 normalization과 같은 효과를 지니게 된다. 그러므로 Fig 3. 과 같은 방법으로 normalization이 가능하다.

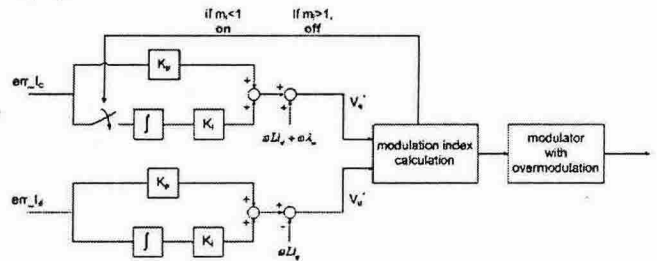


Fig. 3. Proposed simple anti-windup method

5. Simulation & Experiment results

5.1 simulation result

conventional normalization에서 논문에서 언급한 문제점이 발생하는 파형이다. m_i=1에서 d축 전류가 증가하기 시작하고, 결과적으로 m_i=1에서 모터의 효율과 속도가 모두 떨어지는 현상이 발생한다.

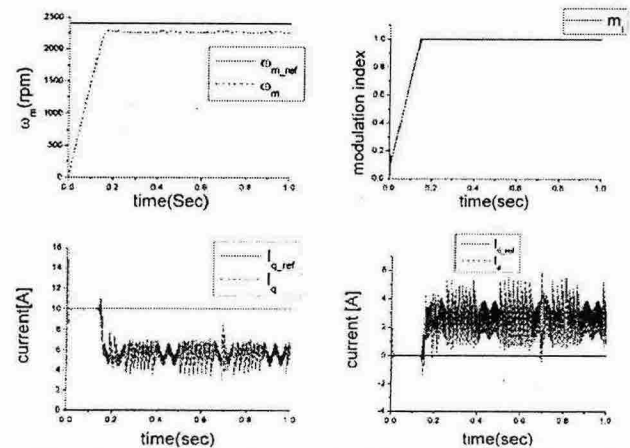


Fig. 4. conventional normalization method(simulation)

제안된 방법을 적용한 시뮬레이션 파형이다. 기존의 방법과 달리 $m_i=1$ 에서 i_d 의 평균값이 명령을 잘 추종하고 있다. $m_i=1$ 에서 Six-step operation에 의해 전류 리플이 발생하게 된다. 전류 리플은 제어대상이 아니므로, 리플을 동반한 채로 평균값으로 q,d 축 전류가 제어되게 한다.

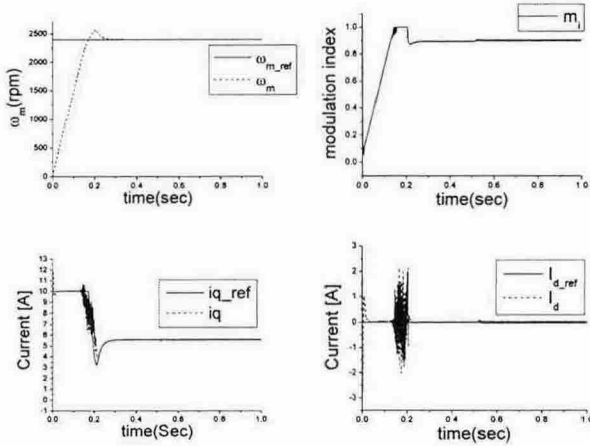


Fig. 5. proposed normalization method(simulation)

5.2 Experiment result

SPMSM spec:

$$R=0.49[\Omega], L=6.9e-3[H], \lambda_m=0.066[V \cdot sec]$$

DSP controller:

$$TMS320C31, PWM \text{ frequency: } 5kHz$$

Fig 6.은 기존의 normalization에서 나타나는 문제점을 실험으로 확인한 파형이다. 속도 명령을 잘 따라 가지 못하고, d축 전류가 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 여기서 속도는 기준점 보다 한 칸 아래에서 0rpm으로 한다.

Fig. 7.은 제안한 simple anti-windup 으로 구성된 경우의 실험 파형이다. $m_i=1$ 인 시점에서 q축과 d축에 전류 리플이 발생하지만, 그 평균값들은 명령을 잘 따르고 있음을 알 수 있다. d축 전류 명령은 "0" 이므로 실험파형에서는 생략하였다.

Fig. 8.은 제안한 방법을 사용할 경우 Six-step operation의 안정성과 성능을 살펴본 경우이다. 속도 명령을 최대 올렸다가 다시 0으로 떨어뜨림으로써, Six-step으로 시스템이 들어가거나 나올 때에 문제가 없는 지에 대해 확인해 보았고, 실험 파형으로부터 Six-step에서도 만족할 만한 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

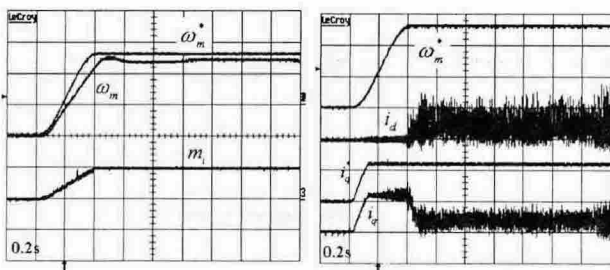


Fig. 6. conventional normalization method

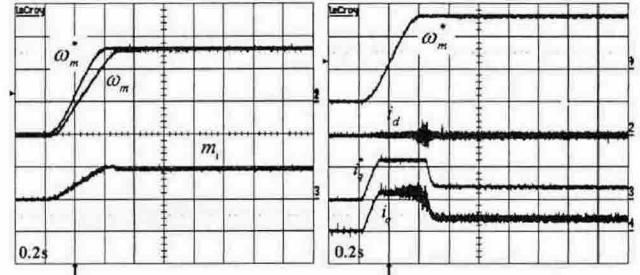


Fig. 7. conventional normalization method

속도명령을 추정할 수 없는 값을 주었을 때 파형이다.

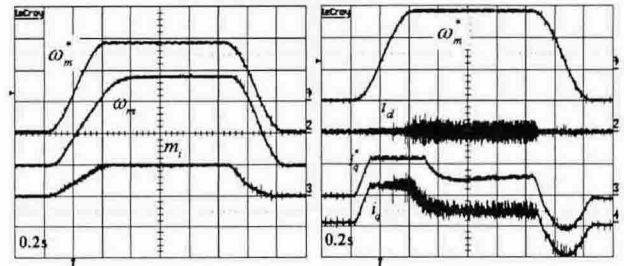


Fig. 8. Six-step operation(conventional normalization method)
 $\omega_m, \omega_m^* : [krpm/div]$ $i_q, i_q^*, i_d, i_d^* : [5A/div]$
 $m_i : [1.0/div]$

6. Conclusion

본 논문에서는 과변조에서 전류제어를 할 경우 나타나는 문제점 중에 하나인 normalization 문제점에 대해 분석하였다. 기존의 normalization 방법의 문제점은 속도 변화량에 대한 전압의 증가량을 고려하지 않고, 단지 위상오차 없이 전압을 줄이는 방식을 택했기 때문에, d축 전류가 양의 값으로 제어되는 문제점을 만들었다.

제안된 방식에서는 d축만을 제어함으로써 이 문제를 해결하였고, 결과적으로 전동기의 속도와 효율 둘 다 상승시키게 되었다. 그리고 제안된 방식을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 한국과학기술원 인간친화복지로봇센터(HWRS-ERC)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Ashwin M. Khambadkone, Compensated Synchronous PI Current Controller in Overmodulation Range and Six-Step Operation of Space-Vector-Modulation-Based Vector-Controlled Drives, IEEE trans. on Industrial Electronics, pp 574-580,2002
- [2] Hag-Wone Kim, Nguyen Van Nho, Current control of PM Synchronous Motor in Overmodulation Range, Industrial Electronics Society, 2001. IECON'01, pp 1184-1189,2001
- [3] N.V. Nho, M.J. Youn, Two-mode overmodulation in two-level VSI, Proc. Conf. Rec. IEEE PEDS Conference 2003, pp. 1274-1279
- [4] Jul-Ki Seok, Joohn-Sheok Kim, Overmodulation Strategy for High-Performance Torque Control, IEEE Trans on Power Electronics, pp 674-689, 1998
- [5] Ahmet M. Hava, Seung-Ki Sul, Dynamic Characteristics of Triangle Intersection PWM methods, pp 896-907, 1999